

MIG – PV: Efeito da corrente negativa e proporção de eletrodo negativo sobre a penetração de cordões de solda em alumínio

 <https://doi.org/10.56238/sevned2024.010-050>

Leandro Rubén González

Mestrando em Engenharia Mecânica (UFRGS)
Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Endereço: Porto Alegre – Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: leorubengonzalez@gmail.com

Rafael Ellwanger Pimentel

Doutorando em Engenharia Mecânica (UFRGS)
Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Endereço: Porto Alegre – Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: rafaellpimentel@hotmail.com

Arnaldo Ruben Gonzalez

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (UFRGS)
Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Endereço: Porto Alegre – Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: ruben@mecanica.ufrgs.br

Matheus Botega

Mestrando em Engenharia Mecânica (UFRGS)
Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Endereço: Porto Alegre – Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: matheusbotega94@gmail.com

RESUMO

O processo MIG (Metal Inert Gas) com polaridade variável (PV) é um processo relativamente novo que pode ser aplicado na indústria de processos de soldagem com altas taxas de deposição e custo competitivo. O processo utiliza curvas compostas de pulsos nas polaridades positiva e negativa, e apresenta como principais benefícios, em relação ao processo convencional, alta taxa de fusão, aliada ao baixo aporte térmico, menores deformações e um melhor controle da penetração e diluição. O objetivo deste trabalho é analisar o efeito da corrente negativa (In) e da proporção de eletrodo negativo (%EN) da curva de corrente típica do processo polaridade variável sobre a penetração dos cordões de solda. Para o estudo foram usados três níveis de In de -70 A, -50 A, e -30 A e quatro níveis de percentagens de %EN de 20%, 30%, 40% e 50%, aplicando projeto de experimentos fatorial totalmente cruzado. Foram realizados cordões de solda na posição plana (1G), depositando alumínio ER5356 sobre a superfície livre da chapa de Al5052-F. Sugere-se que, para a proporção de eletrodo negativo (% EN), deve ser considerado o valor da corrente negativa, para se obter maior aproximação aos efeitos de In e %EN sobre a penetração. O efeito da In sobre a penetração é de 13,1%, entretanto o efeito de %EN é de 71,6%, também a interação entre In e %EN é estatisticamente significativa contribuindo com 11,0%. Foi concluído que um decréscimo na corrente negativa em módulo causa redução na penetração. Assim como o aumento da proporção de eletrodo negativo causa diminuição na penetração no cordão de solda.

Palavras-chave: MIG PV, Corrente Negativa, Proporção de eletrodo negativo, Penetração, Soldagem de alumínio.



1 INTRODUÇÃO

Nos processos de fabricação, após a consolidação do processo de produção em grande escala, a necessidade de unir materiais similares ou dissimilares tornou-se imprescindível. Nesse contexto, a tecnologia da soldagem surgiu como um grande aliado para a elaboração de projetos e criação de produtos que, cada vez mais, demandam pesquisa e tecnologia, principalmente na área de união de metais.

Na atualidade existe, no setor industrial, uma predominância na utilização de processos de soldagem ao arco elétrico, sendo o processo MIG/MAG o mais largamente empregado, tanto para revestimento quanto para preenchimento. O processo MIG/MAG foi patenteado em 1930 por Hobart e Devers e chamado de GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), segundo (NASCIMENTO E VILARINHO, 2006), e na atualidade, este é mundialmente difundido e amplamente aplicado, sendo o principal método de soldagem utilizado, de acordo com (MIRANDA E FERRARESI, 2003). O processo MIG/MAG apresenta uma gama de vantagens, tais como a alta taxa de deposição, uma considerável e indiscutível qualidade do cordão de solda, aliados a um custo moderado de produção do processo.

Devido ao constante aumento de demanda de produtividade, surgiu a necessidade de que o processo de soldagem se tornasse mais flexível e a otimização e constante melhora do processo MIG/MAG fez que uma das suas variantes seja a denominada (MIG/MAG) Polaridade Variável (PV). Este método é ainda pouco difundido no processo produtivo e tem como característica principal a alta taxa de deposição de material.

Existe, em contrapartida, um porém no processo MIG/MAG PV, que é justamente o ajuste dos seis parâmetros da curva de corrente de soldagem, que gerem cordões de solda em condições satisfatórias, isto se dá basicamente pelo método de tentativa e erro até o ponto em que se atinge uma lacuna de valores de parâmetros que atendem as características desejadas (DUTRA ET AL., 2015).

Particularmente, neste trabalho foi escolhido o processo de soldagem MIG/MAG Polaridade Variável para realizar os cordões de solda, já que permite o controle acurado das características do cordão. Este processo proporciona o melhor controle de penetração, menor diluição e ainda, como vantagem, uma menor distorção, de acordo com (BAUMGAERTNER, 2017) e (TONG ET AL., 2001).

2 OBJETIVO

Considerando a complexidade da seleção dos parâmetros, este trabalho visa analisar a corrente negativa e a proporção de eletrodo negativo (%EN), variando tempo da corrente negativa, com o objetivo de entender a variação da corrente negativa quando aplicadas as fórmulas da proporção de eletrodo negativo sobre a penetração do cordão de solda, utilizando o projeto fatorial totalmente cruzado.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG POLARIDADE VARIÁVEL

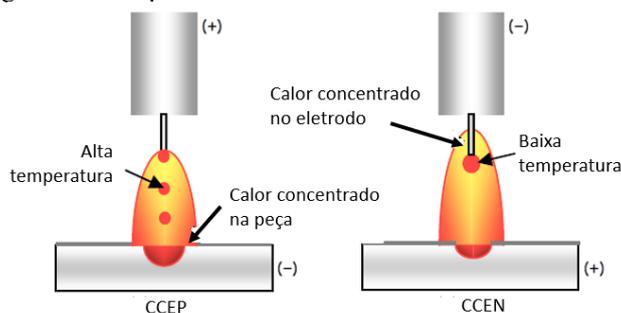
Atualmente, o processo MIG/MAG é um dos processos de soldagem mais utilizados para a produção de cordões de solda em grandes extensões, como no revestimento de superfícies, resistentes ao desgaste, à corrosão, ao calor, entre outros. Todavia, normalmente alguns problemas são encontrados, principalmente no revestimento realizado por soldagem, como por exemplo, a elevada fusão do metal base que produz elevadas diluição e distorções. O processo de soldagem MIG/MAG com a utilização de uma corrente alternada seria o ideal para resolver algumas das dificuldades listadas acima, segundo (TONG ET AL., 2001).

Na literatura são definidas duas nomenclaturas distintas: corrente alternada pulsada (CA) ou polaridade variável (PV). (NASCIMENTO E VILARINHO, 2006) citam que as duas formas de nomenclatura estão relacionadas com a utilização da polaridade negativa no processo de soldagem. Entretanto, a corrente alternada está vinculada à forma de onda senoidal, onde a parte positiva e a parte negativa são muito próximas, de igual grandeza. Logo, a expressão polaridade variável está relacionada com formas de onda retangulares com variação entre as polaridades, positiva e negativa na curva de corrente de soldagem, podendo conter maior tempo e intensidade em sua parte positiva, ou, do mesmo modo, na negativa.

O processo de soldagem MIG/MAG Polaridade Variável (Figura 2) é usado para descrever formas de onda retangulares (alternadas em polaridade) nas quais a razão entre as duas polaridades pode ser variada e usada como parâmetro de processo a “proporção de eletrodo negativo – %EN”.

A polaridade negativa, corrente contínua e eletrodo negativo (CCEN), altera de maneira drástica o comportamento do processo MIG/MAG, modificando a distribuição de energias entre o eletrodo e a peça. Na Figura 1, (KIM ET AL., 2007) afirmam que no processo polaridade positiva, corrente contínua e eletrodo positivo (CCEP), a maior concentração de calor acontece na peça, em consequência, a penetração é maior, e pode trabalhar-se com vários modos de transferência. No entanto, em eletrodo negativo (CCEN), essa situação se inverte, sendo grande parte do calor gerado se concentra no eletrodo, e com isso ocorre aumento da taxa de fusão, aumento da tensão do arco elétrico, diminuição da temperatura na peça e redução da penetração, também afeta o modo de transferência, que na maioria dos casos é globular.

Figura 1 – Comportamento do arco elétrico em CCEP e CCEN.



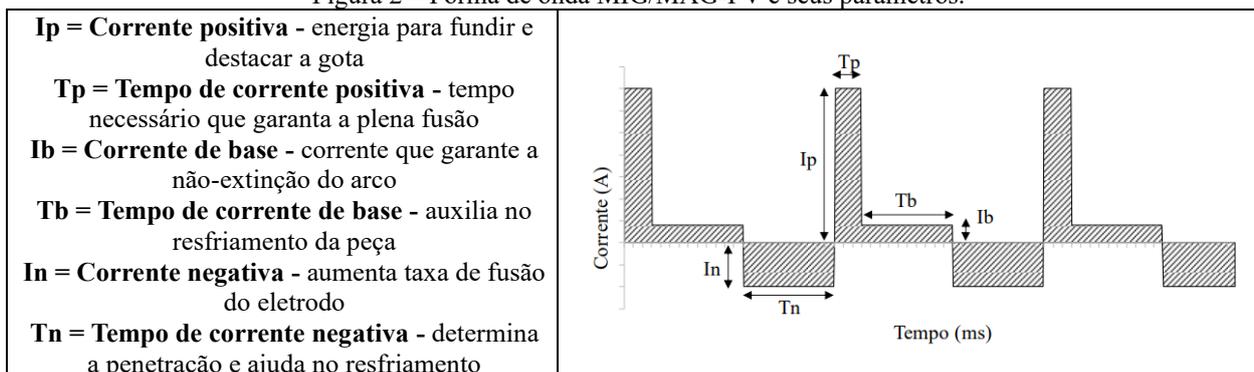
Fonte: Adaptado de (KIM ET AL., 2007).

(TONG ET AL., 2001) realizaram estudos utilizando CCEN comparado com o MIG/MAG convencional (CCEP), apresentando o CCEN menores valores de temperatura na peça. Consequência disto, verificaram uma redução da deformação da peça final, assim como uma menor penetração e diluição. Este benefício também foi comprovado por (PARK ET AL., 2009), os quais verificaram a redução na temperatura da peça soldada com o aumento da utilização do eletrodo negativo.

No processo MIG/MAG PV, é possível obter maior taxa de fusão, aliada à baixa temperatura no metal base, gerando grandes instabilidades no arco elétrico e na transferência do metal desde a ponta do eletrodo à poça de fusão, na grande maioria das situações impossibilitando a utilização de CCEN no processo MIG/MAG. A instabilidade é explicada por (TALKINGTON, 1998), principalmente pelo modo de transferência do metal, que se limita ao modo globular para CCEN. Mas para minimizar a instabilidade do arco e assim utilizar os benefícios do eletrodo negativo, como a redução da penetração, redução da temperatura no metal base, é aplicado ao processo o eletrodo positivo, o qual traz consigo a estabilidade do arco elétrico. De acordo com (JOSEPH, 2003), cada polaridade apresenta um balanço de calor, mas combinadas possibilitam o controle do calor da peça e eletrodo, assim como o controle da penetração, e segundo (DUTRA, 2015), esta combinação gera baixas temperaturas aliadas a aumentos da taxa de fusão (produtividade) no processo de soldagem.

A curva de corrente utilizada neste trabalho do processo de MIG/MAG Polaridade Variável apresenta três partes: pulso positivo, base positiva e pulso negativo. Conforme a Figura 2, a forma de onda do processo de soldagem MIG/MAG PV é formada pela parte positiva, o qual contém quatro parâmetros: corrente de pico (I_p), tempo de pico (T_p), corrente de base (I_b), tempo de base (T_b), e a parte negativa: corrente negativa (I_n) e tempo de corrente negativa (T_n).

Figura 2 – Forma de onda MIG/MAG-PV e seus parâmetros.



Fonte: Autor (2024).

Conforme (TONG, 2001), uma corrente de base positiva com duração aproximada de 1,5 ms antes ou após do pulso de destacamento (corrente de pico positivo), recomendada para soldagem de alumínio, é um mecanismo que permite que a gota chegue na poça de fusão livre de forças repulsivas, dessa forma minimiza ou evita salpicos. O degrau da corrente de base, antes e/ou depois do pulso de destacamento, auxilia na amenização da rápida inversão de polaridade e na estabilização do arco elétrico, segundo (NASCIMENTO, 2011).

3.2 PROPORÇÃO DO ELETRODO NEGATIVO (%EN)

Junto com a utilização da equação para a proporção de eletrodo negativo, os seguintes autores: (FARIAS, 2005; MONTEIRO E SCOTTI, 2013; NASCIMENTO, 2011; SO ET AL., 2010; TONG, 2001) utilizam a penetração como objeto de estudo, buscando melhorias nos processos, para assim por exemplo, aprimorar passes de raiz, fechamento de abertura entre chapas ou soldagem para revestimento, onde há necessidade de um maior controle da penetração no processo de soldagem. E o entendimento dos efeitos do eletrodo negativo através de apenas um fator (%EN), facilitaria a aplicação da polaridade variável em nível industrial.

A curva de corrente da Figura 2 é constituída por pulsos retangulares formado por seis diferentes parâmetros. A escolha e entendimento desses seis diferentes parâmetros tornam o processo bastante complexo à parametrização, isto é, a combinação adequada dos valores dos parâmetros para a resposta desejada. Por essa razão, muitos autores utilizam um fator que representa o percentual da polaridade negativa em relação ao total da curva de corrente, chamado de proporção de eletrodo negativo (%EN), o qual é utilizado para entender a variação da polaridade negativa em relação às variáveis do processo de soldagem, como por exemplo a penetração, diluição, temperatura, entre outros. A proporção %EN é encontrada da literatura em duas formas diferentes de cálculo conforme às Eqs. (1) e (2).

A Eq. (1) considera apenas os tempos entre as polaridades, tendo como resposta a proporção do tempo de corrente negativa (T_n) em relação ao período total do pulso (T), sendo este a soma do tempo de corrente de base (T_b) e pico positivos (T_p) e o tempo de corrente negativa (T_n). Este método de

cálculo foi utilizado pelos seguintes autores: (CIRINO, 2009; DUTRA ET AL., 2015; MONTEIRO E SCOTTI, 2013; NASCIMENTO ET AL., 2008; NASCIMENTO, 2011; SANTOS, 2008; VILARINHO ET AL., 2009).

$$\%EN = \frac{T_n}{T_n + T_p + T_b} \times 100\% \quad (1)$$

Porém, pode ser encontrada na literatura uma segunda forma de cálculo do percentual de eletrodo negativo. A proporção calculada segundo a Eq. (2) considera a composição do tempo e a intensidade da corrente negativa em relação ao total da onda de corrente no período. Em resumo, o termo '%EN' compara a área da curva corrente em função do tempo ($I \times T$) da corrente na parte negativa em relação ao total da área de um ciclo de pulso. Este tipo de cálculo foi utilizado pelos seguintes pesquisadores: (FARIAS, 2005; KAH, SUORANTA E MARTIKAINEN, 2013; KIM ET AL., 2002; KIM ET AL., 2007; PARK ET AL., 2009; SO ET AL., 2010).

$$\%EN' = \frac{I_n \times T_n}{(I_n \times T_n) + (I_p \times T_p) + (I_b \times T_b)} \times 100\% \quad (2)$$

Essencialmente, a diferença entre as duas formas de cálculo é a seguinte: na Equação (1) são considerados apenas os tempos (T_n , T_p , T_b) de aplicação de correntes e não as suas respectivas intensidades (I_n , I_p , I_b), enquanto que na Eq. (2) o %EN é calculado considerando os seis parâmetros da curva de corrente. Considerando um conjunto arbitrário de valores desses seis parâmetros, dependendo se utilizado a Eq.(1) ou Eq.(2), pode-se chegar a valores diferentes de %EN.

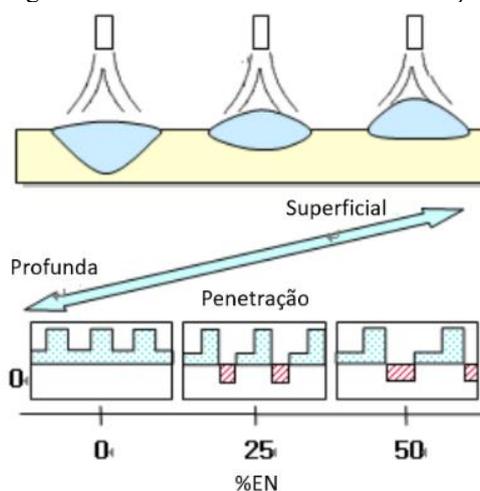
Contudo, conforme apresentado por (FARIAS, 2005) e (KIM ET AL., 2002), os quais utilizaram a Eq.(2), ou como demonstrado por (NASCIMENTO, 2008), utilizando a Eq.(1), quanto maior o valor da proporção de eletrodo negativo (%EN), menores são os valores obtidos da penetração.

Em geral, o aumento na percentagem da polaridade negativa na curva de corrente gera uma redução da penetração na geometria do cordão de solda. Esta condição é representada por (KIM ET AL., 2002) na Figura 3, onde é ilustrado o aumento da percentagem da polaridade negativa, considerado pelo valor de %EN entre 0% e 50%, e por sua vez os efeitos na penetração e característica do cordão de solda.

Experimentos foram realizados por (KIM ET AL., 2002) com arames de alumínio e gás de proteção argônio puro, em chapas de alumínio finas de 1 a 2 mm de espessura, variando o %EN entre 5% até 40%, com objetivo de controlar a penetração no processo de soldagem. Os resultados

encontrados das seções transversais do cordão de solda mostram que aumentando a proporção de eletrodo há redução na penetração do cordão de solda.

Figura 3 – Efeito de %EN sobre a Penetração.



Fonte: Adaptado de (KIM ET AL., 2002).

3.3 PROJETO DE EXPERIMENTOS FATORIAL TOTALMENTE CRUZADO

Os projetos de experimentos tiveram importante impacto nas indústrias de manufatura, incluindo o design de novos produtos e a melhoria dos existentes, o desenvolvimento de novos processos de fabricação e a melhoria de processos.

Os experimentos fatoriais têm várias vantagens. Eles são mais eficientes do que experimentos realizados variando apenas um fator por vez. Além disso, um planejamento fatorial é necessário quando as interações podem estar presentes para evitar conclusões enganosas.

Finalmente, os projetos fatoriais permitem que os efeitos de um fator sejam estimados em vários níveis dos outros fatores, gerando conclusões que são válidas em uma variedade de condições experimentais.

Segundo (MONTGOMERY, 2009), os tipos mais simples de experimentos fatoriais envolvem apenas dois fatores ou conjuntos de tratamentos. Existem a níveis do fator A e b níveis do fator B, e estes são arranjados em um planejamento fatorial; ou seja, cada réplica do experimento contém todas as combinações de tratamento ab . Em geral, existem n réplicas.

A seguir apresenta-se um caso geral de um experimento fatorial de dois fatores, seja y_{ijk} a resposta observada quando o fator A está no i -ésimo nível ($i = 1, 2, \dots, a$) e o fator B está no j -ésimo nível ($j = 1, 2, \dots, b$) para a k -ésima replicação ($k = 1, 2, \dots, n$). A sequência em que as abn observações são feitas é selecionada aleatoriamente para os tratamentos do projeto fatorial totalmente cruzado.

As observações em um experimento fatorial podem ser descritas, pela Eq.(3) por um modelo de efeitos:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

Onde μ é o efeito médio geral, τ_i é o efeito do i -ésimo nível do fator de linha A, β_j é o efeito do j -ésimo nível do fator de coluna B, $(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação entre τ_i e β_j , e ϵ_{ijk} é um componente de erro aleatório.

3.4 COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS – TESTE DE TUKEY

Quando a ANOVA indica que as médias de linha ou coluna diferem, geralmente é interessante fazer comparações entre as médias de linha ou coluna individuais para descobrir as diferenças específicas. Há vários métodos de comparação múltipla, por exemplo, o método de Scheffé, o método de Fischer da diferença mínima significativa (LSD), Dunnett (1964), Duncan e o Tukey (1953) que são úteis nesse sentido, de acordo com (MONTGOMERY, 2009).

Em muitas situações práticas, é necessário comparar apenas pares de médias. Frequentemente, podem ser determinadas quais médias diferem testando as diferenças entre todos os pares de médias de tratamento

Quando há interesse em comparar todos os pares de médias de um tratamento e as hipóteses nulas a testar é $H_0: \mu_i = \mu_j$ para todo $i \neq j$. Existem vários procedimentos disponíveis para esse problema, mas neste trabalho será aplicado o teste de Tukey.

3.4.1 Teste de Tukey

Supor que, após uma ANOVA na qual é rejeitada a hipótese nula de médias de tratamento igual, o objetivo é testar todas as comparações de médias pareadas:

$$H_0: \mu_i = \mu_j$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

para todo $i \neq j$. Segundo (MONTGOMERY, 2009), Tukey (1953) propôs um procedimento para testar hipóteses para as quais o nível de significância geral é exatamente α quando os tamanhos das amostras são iguais e no máximo α quando os tamanhos das amostras são desiguais. Seu procedimento também pode ser usado para construir intervalos de confiança nas diferenças em todos os pares de médias. Para esses intervalos, o nível de confiança simultâneo é de $100(1 - \alpha)$ por cento quando os tamanhos das amostras são iguais e de pelo menos $100(1 - \alpha)$ por cento quando os tamanhos das amostras são desiguais. O procedimento de Tukey usa o erro do experimento no nível selecionado de

α . Este é um excelente procedimento de avaliação de dados quando o interesse se concentra em pares de médias.

O procedimento de Tukey faz uso da estatística de distribuição:

$$q = \frac{\bar{y}_{max} - \bar{y}_{min}}{\sqrt{MQE/n}} \quad (4)$$

Onde \bar{y}_{max} e \bar{y}_{min} são as maiores e menores médias amostrais, respectivamente, de um grupo de p médias amostrais. Da literatura (MONTGOMERY, 2009), pode-se encontrar valores de $q_{\alpha}(a, f)$, os α pontos percentuais superiores de q , onde f é o número de graus de liberdade associado à média quadrada do termo erro (MQE). Para tamanhos de amostra iguais, o teste de Tukey declara duas médias são significativamente diferentes se o valor absoluto de suas diferenças de médias exceder o valor de T_{α} calculado pela Eq.(5).

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(a, f) \sqrt{\frac{MQE}{n}} \quad (5)$$

Onde, MQE : Média Quadrada do termo Erro (da ANOVA); a : Número de tratamentos; f : Graus de Liberdade do Erro; n : Número de repetições; α : Nível de significância.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental foi desenvolvida no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas do Centro de Tecnologia da UFRGS. A fonte de soldagem utilizada foi a DIGIPlus A7 450. Para a condução da tocha foi usado um robô MOTOMAN (Yaskawa), para garantir o avanço e controle de velocidade, assim como a manutenção da distância bico de contato-peça (DBCP), tudo foi devidamente alinhado com auxílio de um nível para que o sistema ficasse horizontal.

O equipamento da IMC Soldagem, o SAP4.01 foi usado para a aquisição de dados, para a coleta dos valores instantâneos de corrente e tensão numa taxa de 5000 amostras por segundo. No SAP4.01 é possível obter os gráficos dos valores instantâneos durante a execução do cordão de solda. A Figura 4 mostra os equipamentos utilizados no experimento.

Os cordões de solda foram depositados sobre chapas de alumínio AA5052-F de dimensões 150x100x8 mm, o metal de adição utilizado foi o AWS A5.10: ER5356 de 1,2 mm de diâmetro. O gás de proteção foi o Ar com vazão de 18 l/min. Os cordões de solda foram depositados sobre a superfície livre (*bead-on-plate*) na posição plana (1G). A composição química do metal base e a do metal de adição estão descritos nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

A curva da corrente de polaridade variável utilizada neste trabalho (Figura 2) é composta de seis (6) parâmetros (fatores) independentes, dos quais dois (2) deles foram variados, I_n e T_n . A partir da variação de T_n foi possível obter a proporção de eletrodo negativo (%EN). Os demais parâmetros I_p , T_p , I_b e T_b foram mantidos constantes para todos os cordões de solda realizados.

Com o objetivo de analisar o comportamento da polaridade negativa foram variadas a corrente negativa (I_n) em três níveis: -70, -50 e -30 A, a proporção de eletrodo negativo (%EN) em quatro níveis: 20; 30; 40 e 50 %, mediante a variação do tempo de corrente negativa (T_n) entre 1,5; 2,5; 3,9 e 5,8 ms, respectivamente. Os parâmetros mantidos constantes no experimento foram: intensidade da corrente de pico (I_p) de 280 A, tempo de pico positivo (T_p) de 1,8 ms, e para a não extinção do arco elétrico, a corrente de base (I_b) foi mantida constante em 65 A com um tempo de 4,0 ms, conforme a Tabela 3. Com esses valores para cada combinação foram obtidos estabilidade do arco elétrico, mediante o ajuste da velocidade de alimentação do arame. Os demais parâmetros do processo de soldagem foram mantidos constantes conforme a Tabela 4.

Tabela 1 – Composição química do metal base (%) segundo fornecedor.

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
AA 5052F	0 - 0,25	0 - 0,40	0 - 0,10	0 - 0,10	2,20 - 2,80	0,15 - 0,35	0 - 0,10	Restante

Fonte: Autor (2024).

Tabela 2 – Composição química do metal de adição (%) segundo AWS A5.10 – ER5356.

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
ER5356	0,25	0,4	0,1	0,2	5,0	0,2	0,1	0,2	Rest.

Fonte: Autor (2024).

Figura 4 – Equipamentos de soldagem à esquerda, robô Motoman o e equipamentos de aquisição de dados, a fonte de soldagem IMC e o alimentador de arame.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 3 – Parâmetros da Curva de Corrente do Processo MIG Polaridade Variável

Parâmetros		Nível			
Descrição	Símbolo				
Corrente negativa (A)	In	-70	-50	-30	
Proporção de Eletrodo Negativo	%EN	20	30	40	50
Tempo de corrente negativa (ms)	Tn	1,5	2,5	2,9	5,8
Proporção de Eletrodo Negativo Eq.(2)	%EN'	18,6	13,3	8,9	5,6
Corrente de pico (A)	Ip	Constante = 280			
Tempo de pico positivo (ms)	Tp	Constante = 1,8			
Corrente de base (A)	Ib	Constante = 65			
Tempo de base (ms)	Tb	Constante = 4,0			

Fonte: Autor (2024).

Tabela 4 – Parâmetros do Processo de Soldagem

Parâmetros do Processo	Símbolo	Valores Constantes
Velocidade de Soldagem (mm/s)	Vs	3,0
Ângulo de deslocamento da tocha (puxando) (°)		+10
Distância bico de contato peça (mm)	DBCP	18
Vazão gás de proteção (l/min)		18

Fonte: Autor (2024).

Para o estudo do efeito da proporção de eletrodo negativo foi aplicado um projeto de experimento fatorial totalmente cruzado (múltiplos níveis), com os seguintes parâmetros e níveis, a execução dos cordões de solda foi segundo a matriz de experimentos da Tabela 5.

Parâmetros do Projeto de Experimentos (Fatores fixos e independentes)

- Três níveis da Corrente negativa (A) – In: -70 -50 -30
- Quatro níveis da Proporção da Polaridade Negativa (%) - %EN: 20 30 40 50

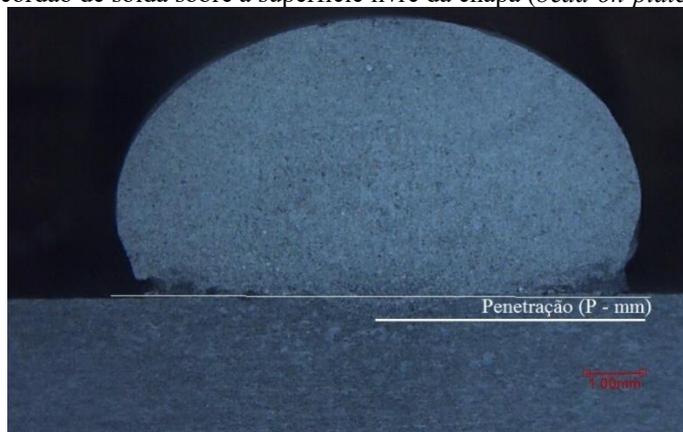
4.1 MATERIAIS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA

Finalizados os cordões de solda, iniciou-se o processo de geração e tratamento das amostras. O primeiro passo foi realizar o corte transversal dos cordões com o uso da máquina de corte *Cut-off*, a fim de obter os corpos de prova de aproximadamente 1,5 cm de comprimento de cordão. Na sequência, as amostras foram lixadas nas granulometrias 120, 220, 320, 400, 500, 600 e 1000, certificando-se de começar todas as amostras no mesmo sentido e de girar a amostra 90° a cada mudança de granulometria de lixa.

As seções transversais para as macrografias foram atacadas com o reagente 10% HF (48%) + 90% H₂O, conforme a norma ASTM E340-15, com o propósito de obter contraste entre o metal de solda e o metal base. Todos os ataques foram feitos em uma capela e com equipamentos de segurança apropriados. As macrografias foram obtidas mediante o uso de um microscópio com lente de aumento 8x e analisadas usando o software livre ImageJ, com o qual foram medidas a variável de resposta: penetração (P – mm), conforme a Figura 5.

Na Tabela 5 se apresenta a sequência aleatorizada de soldagem dos corpos de prova de acordo com a combinação dos níveis dos fatores controláveis e a resposta considerada neste trabalho: penetração (P – mm).

Figura 5 – Esquema do cordão de solda sobre a superfície livre da chapa (*bead-on-plate*) e a variável de resposta.



Fonte: Autor (2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 5 se apresenta a sequência aleatorizada de soldagem dos corpos de prova de acordo com a combinação dos níveis dos fatores controláveis e a resposta penetração (P – mm).

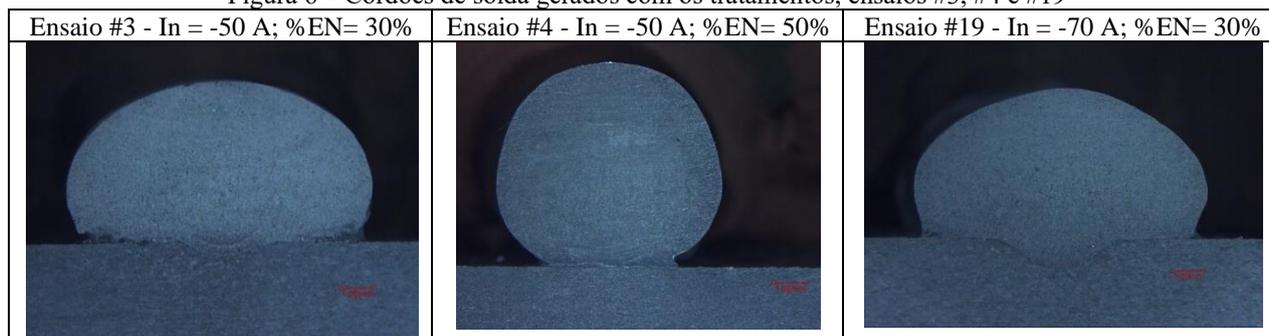
Na Figura 6, estão as imagens correspondentes aos ensaios #3, #4 e #19 dos 24 cordões gerados pelo projeto fatorial completamente cruzado. O aspecto visual dos ensaios #13 e #23 podem ser observados na Figura 7.

Tabela 5 – Sequência (aleatorizada) e combinação dos parâmetros segundo o projeto de experimentos para a soldagem dos corpos de prova, e penetração

Ordem Padrão	Seq. Ensaio	In (A)	%EN (%)	P (mm)
12	#1	-30	50	0,000
15	#2	-70	40	0,292
6	#3	-50	30	0,436
8	#4	-50	50	0,000
23	#5	-30	40	0,000
5	#6	-50	20	1,027
1	#7	-70	20	0,681
3	#8	-70	40	0,250
21	#9	-30	20	0,791
18	#10	-50	30	0,325
20	#11	-50	50	0,171
13	#12	-70	20	0,925
22	#13	-30	30	0,459
7	#14	-50	40	0,266
4	#15	-70	50	0,472
11	#16	-30	40	0,000
9	#17	-30	20	0,671
16	#18	-70	50	0,278
2	#19	-70	30	1,080
17	#20	-50	20	0,899
14	#21	-70	30	0,966
10	#22	-30	30	0,571
19	#23	-50	40	0,000
24	#24	-30	50	0,000

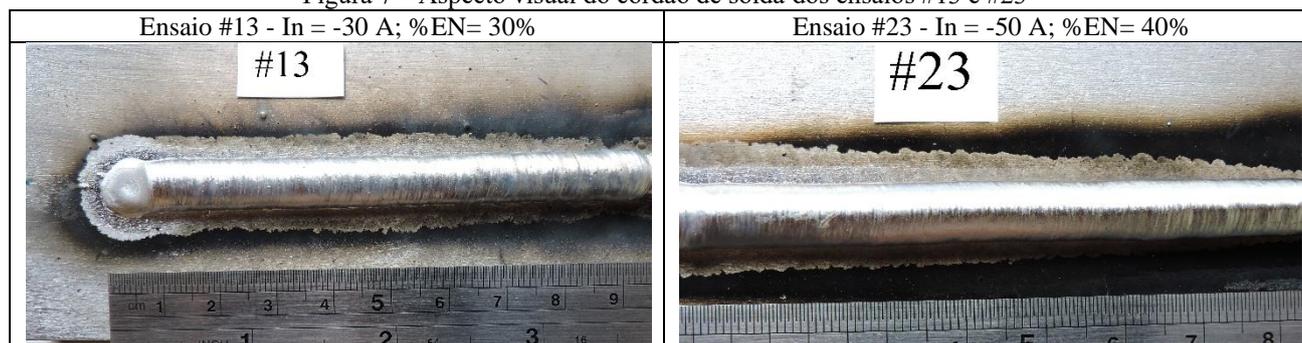
Fonte: Autor (2024).

Figura 6 – Cordões de solda gerados com os tratamentos, ensaios #3, #4 e #19



Fonte: Autor (2024).

Figura 7 – Aspecto visual do cordão de solda dos ensaios #13 e #23



Fonte: Autor (2024).

Para avaliar de maneira mais consistente os efeitos (linear e quadrático) dos fatores principais empregados e as interações de dois fatores sobre a resposta observada foi submetida à análise de variância.

Através do *software Minitab®*, os dados da Tabela 5 foram processados para a análise de qual parâmetro e/ou interação exerce efeito na penetração (P). Para essa análise foi utilizado um intervalo de confiança de 95%, ou seja, para valores de alfa (α) menores que 5%, admitiu-se que a variável de controle em questão é significativa na resposta. Vale ressaltar que quanto menor for o valor de *Valor-p*, maior será a influência do parâmetro na resposta analisada.

As seções a seguir apresentarão a Tabela ANOVA, o gráfico de Pareto, gráficos dos parâmetros principais e interação, que mostrarão as influências dos parâmetros principais e suas combinações na resposta, e quais deles são significativos.

5.1 PENETRAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Na Tabela 6 apresenta-se a Análise de Variância (ANOVA) para a penetração do cordão de solda. O valor-p pode ser utilizado na determinação da significância dos fatores principais ou interações sobre a penetração. Esse valor é um indicador que quantifica a significância com relação à resposta. O termo “valor-p” é conhecido pela probabilidade de significância, caso apresente valores inferior a 0,05 (5%) pode-se rejeitar a hipótese nula (fator é significativo) com 95% de confiança. Mediante a ANOVA foi determinada que os parâmetros principais In e %EN têm forte efeito significativo na penetração

para um nível de significância $\alpha = 0,05$ (Valor-p < 0,05). Também a interação (In*%EN) apresenta efeito significativo sobre a penetração para um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Tabela 6: Análise de Variância para a penetração versus In (A) e %EN (%)

Fonte	GDL	SQ	MQ	Valor F	Valor-p	Contribuição
Modelo	11	2,9579	0,26890	24,12	0,000	95,67% (R ²)
In (A)	2	0,4052	0,20259	18,17	0,000	13,11%
%EN (%)	3	2,2142	0,73807	66,20	0,000	71,62%
In (A)*%EN (%)	6	0,3385	0,05641	5,06	0,008	10,95%
Erro	12	0,1338	0,01115			4,33%
Total	23	3,0917				100,00%

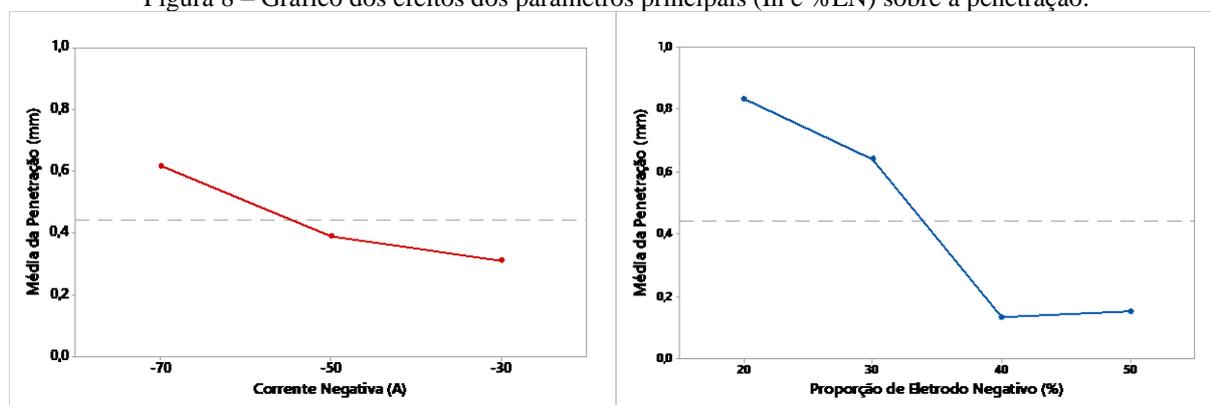
Nota: GDL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos Quadrados
Fonte: Autor (2024).

Na Figura 8 são mostrados os efeitos dos parâmetros principais In e %EN, e observa-se que a penetração sofre um pequeno decréscimo quando a corrente negativa (In) reduz em módulo desde -70 a -30 A, que está de acordo com o encontrado por (BAUMGAERTNER, 2017). A contribuição da variação da corrente negativa na penetração é de 13,1%.

O aumento da proporção de eletrodo negativo (%EN) reduz a penetração conforme aumenta seu valor, vide Figura 8. Para %EN = 20%, a penetração (P) tem valor aproximado de 0,83 mm, quando esse valor passa a 30%, a média de P diminui para um valor para aproximadamente 0,64 mm, aumentando %EN para 40% a P = 0,13 mm e de %EN = 40% a %EN = 50% P= 0,15 mm. Resultados são semelhantes aos encontrados por (KIM ET AL., 2002; KIM ET AL., 2007; VILARINHO ET AL., 2009). A contribuição da variação da proporção do eletrodo negativo sobre a penetração é de 71,6%.

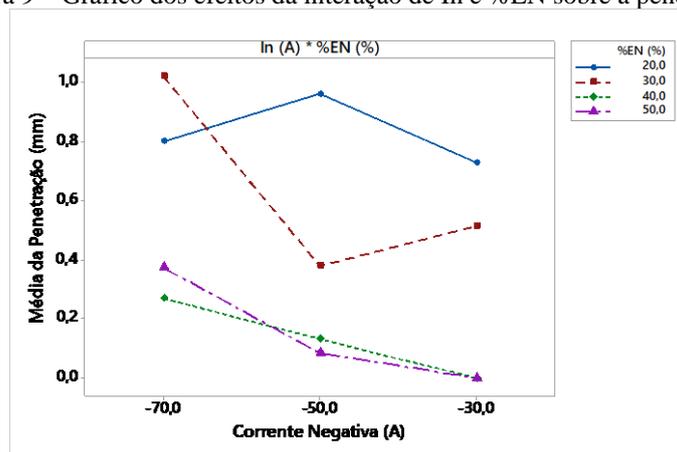
Da Tabela 6 da ANOVA e Figura 9 observa-se que a interação In*%EN é significativa, e a contribuição sobre a penetração é de 11%.

Figura 8 – Gráfico dos efeitos dos parâmetros principais (In e %EN) sobre a penetração.



Fonte: Autor (2024).

Figura 9 – Gráfico dos efeitos da interação de In e %EN sobre a penetração.



Fonte: Autor (2024).

5.2 COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS - TESTE TUKEY

Ao conduzir uma análise de variância (ANOVA) para o modelo de efeitos fixos, a hipótese nula é rejeitada, porque existem diferenças entre as médias de tratamento. Às vezes, nessa situação, comparações e análises adicionais entre grupos de médias de tratamento podem ser úteis, para determinar quais médias diferem testando as diferenças entre todos os pares de médias de tratamento.

Pode aplicar-se o teste Tukey para testar toda e qualquer diferença entre duas médias de tratamento, o método é projetado especificamente para comparações pareadas entre todas as médias de uma população, e aplica-se quando o “valor-p” para tratamentos da ANOVA for significativo.

O teste de Tukey será aplicado nos dados da média de penetração ($P - \text{mm}$) do cordão de solda. Note que neste experimento, a interação é significativa. Quando a interação é significativa estatisticamente, as comparações entre as médias de um parâmetro (por exemplo, **In**) podem ser confundidas pela interação de $\text{In} * \% \text{EN}$. Uma abordagem para essa situação é fixar o fator %EN em um nível específico e aplicar o teste de Tukey às médias do parâmetro In naquele nível. Deseja-se avaliar a corrente negativa (In), para tanto, o interesse é detectar diferenças entre as médias dos seus três níveis. Como a interação é significativa, a comparação se realiza em apenas um nível de %EN, por exemplo, nível 2 (%EN = 30%). É necessário estimar a variância do erro e a melhor estimativa é usar o *MQE* da tabela ANOVA da penetração para os fatores In e %EN, utilizando a suposição de que a variância do erro experimental é a mesma em todas as combinações de tratamento.

5.3 AVALIAÇÃO DA CORRENTE NEGATIVA E %EN CONSTANTE

Mantendo constante %EN = 30%, para cada nível de corrente negativa (-70 A, -50 A, -30 A), a partir dos dados coletados da penetração calcula-se a média da penetração, respectivamente, 1,023 mm, 0,381 mm e 0,515 mm, vide Tabela 7.

A média dos quadrados do termo erro (MQE) = 0,01115 pode ser obtido da ANOVA, vide Tabela 6, os graus de liberdade para termo erro é $f = 12$ e o número de tratamento para a corrente

negativa é $a = 3$, o número de repetições é $n = 2$, o nível de significância é $\alpha = 0,05$. Pode obter-se o valor de $q_\alpha(a, f)$, $q_{0,05}(3,12) = 3,77$. Substituindo os valores na Eq.(5) pode calcular-se $T_{0,05}$.

$$T_{0,05} = q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MQE}{n}} = 3,77 \sqrt{\frac{0,01115}{2}} = 0,281491 \quad (6)$$

Assim, quaisquer pares de médias de tratamento que difiram em valor absoluto em mais de $T_{0,05} = 0,281491$ implicariam que o par correspondente de médias populacionais é significativamente diferente.

Tabela 7: Valores médios da Penetração (mm) do projeto de experimento

In (A)	%EN (%)			
	20	30	40	50
-70	0,803	1,023	0,271	0,375
-50	0,963	0,381	0,133	0,086
-30	0,731	0,515	0,000	0,000

Comparações das médias da penetração para In: -70 A, -50 A e -30 A, mantendo constante %EN = 30%.

	Média 1	Média 2	Módulo	Valor- $T_{0,05}$	Decisão
In -70 A vs In -50 A =	1,023	- 0,381	= 0,643	> 0,281491	Dif. Signif.
In -70 A vs In -30 A =	1,023	- 0,515	= 0,508	> 0,281491	Dif. Signif.
In -50 A vs In -30 A =	0,381	- 0,515	= 0,135	< 0,281491	Não há Dif. Signif.

A análise indica que no nível 2 de proporção de eletrodo negativo (%EN = 30%), na Figura 10 pode observar-se a penetração média do cordão de solda é a mesma quando aplicada a corrente negativa, In = - 50 A e In = - 30 A e que a penetração média para a corrente negativa In = - 70 A é significativamente maior em comparação quando aplicada In = - 50 A e In = - 30 A. Portanto, a diferença na média da penetração entre a corrente negativa de -70 A e -50 A é estatisticamente significativa, assim como a diferença na penetração entre -70 A e -30 A. No entanto, a diferença na penetração entre -50 A e -30 A não é estatisticamente significativa.

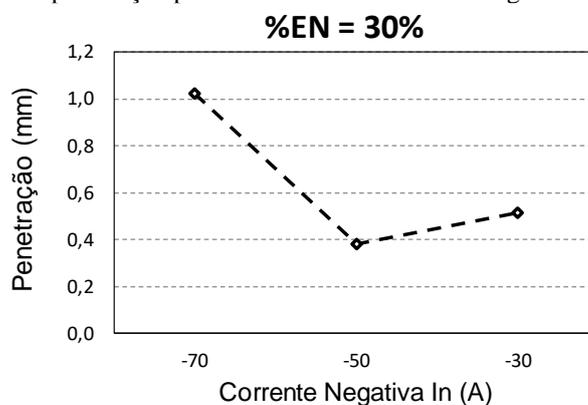
Ao manter constante a proporção de eletrodo negativo, e variar somente a corrente negativa, nos três níveis avaliados, na comparação das médias a diferença não deve ser significativa, para que a média da penetração não seja afetada pelo valor de In. Com isso, fica demonstrado que é necessário considerar o valor da corrente negativa e a proporção do eletrodo negativo para obter a condição desejada de penetração do cordão de solda. Os autores (KIM ET AL., 2002; KIM AT EL., 2007; VILARINHO E NASCIMENTO, 2009) em seus estudos da proporção de eletrodo negativo (%EN) sobre a geometria do cordão de solda não relataram se variaram ou não a corrente negativa.

Neste trabalho não foi avaliado o efeito de %EN', que considera a composição do tempo e a intensidade da corrente negativa em relação ao total da onda de corrente no período. %EN' compara a área da curva corrente em função do tempo ($I \times T$) da corrente na parte negativa em relação ao total da área de um ciclo de pulso.

Da Tabela 6 da ANOVA observa-se que a interação é significativa, portanto, é necessário comparar todas as médias das células $ab = 12$ para determinar quais diferem significativamente. Nesta análise, as diferenças entre as médias das células incluem os efeitos de interação, bem como os dois efeitos principais.

Para realizar as comparações das médias da penetração, o resultado seria 30 comparações entre todos os pares possíveis das médias de doze (12) células.

Figura 10: Média da penetração para %EN = 30% e corrente negativa: -70 A, -50 A e -30 A



Fonte: Autor (2024).

5.4 AVALIAÇÃO DA PROPORÇÃO DA POLARIDADE NEGATIVA E IN CONSTANTE

Deseja-se avaliar se a proporção de eletrodo negativo (%EN), para tanto, o interesse é detectar diferenças entre as médias dos quatro níveis de %EN. Como a interação é significativa, a comparação se realiza em apenas um nível de corrente negativa, por exemplo, nível 1 ($I_n = -70$ A). É necessário estimar a variância do erro e a melhor estimativa é usar o MQE da Tabela 6 da ANOVA da penetração para os fatores I_n e %EN, utilizando a suposição de que a variância do erro experimental é constante em todas as combinações de tratamento.

Mantendo constante $I_n = -70$ A, para cada nível de proporção de eletrodo negativo (20%, 30%, 40%, 50%), a partir dos dados coletados da penetração calcula-se a média da penetração, respectivamente, 0,803 mm, 1,023 mm, 0,271 mm e 0,375, vide Tabela 7 e Figura 11.

Os dados são os seguintes: $MQE = 0,01115$; nº de tratamentos, $a = 4$; graus de liberdade, $f = 12$; nº de repetições, $n = 2$. Pode obter-se o valor de $q_\alpha(a, f)$, $q_{0,05}(4,12) = 4,2$. Substituindo os valores na Eq.(5) pode calcular-se $T_{0,05}$.

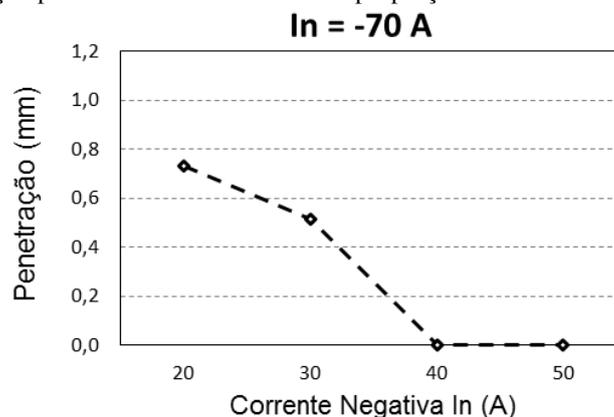
$$T_{0,05} = q_{\alpha}(a, f) \sqrt{\frac{MQE}{n}} = 4,2 \sqrt{\frac{0,01115}{2}} = 0,31359687 \quad (7)$$

Comparações das médias da proporção de eletrodo negativo para %EN: 20%; 30%; 40% e 50%, mantendo constante $I_n = -70$ A.

	Média 1	Média 2	Módulo	Valor- $T_{0,05}$	Decisão
%EN 20% vs %EN 30%	= 0,803	- 1,023	= 0,220	< 0,3136	Não há Dif. Signif.
%EN 20% vs %EN 40%	= 0,803	- 0,271	= 0,532	> 0,3136	Dif. Signif.
%EN 20% vs %EN 50%	= 0,803	- 0,375	= 0,428	> 0,3136	Dif. Signif.
%EN 30% vs %EN 40%	= 1,023	- 0,271	= 0,752	> 0,3136	Dif. Signif.
%EN 30% vs %EN 50%	= 1,023	- 0,375	= 0,648	> 0,3136	Dif. Signif.
%EN 40% vs %EN 50%	= 0,271	- 0,375	= 0,104	< 0,3136	Não há Dif. Signif.

Da comparação das médias da penetração para %EN 20% vs %EN 30% e %EN 40% vs %EN 50% foram determinadas que não há diferença significativas. Entretanto, as médias da penetração para %EN 20% vs %EN 40%, %EN 20% vs %EN 50%, %EN 30% vs %EN 40% e %EN 30% vs %EN 50% são estatisticamente significativas.

Figura 11: Média da penetração para $I_n = -70$ A constante e a proporção de eletrodo negativo (%EN): 20%; 30%; 40%



Fonte: Autor (2024).

6 CONCLUSÕES

Baseado na avaliação da penetração dos cordões de solda com variação dos parâmetros corrente negativa e proporção de eletrodo negativo pode concluir-se que:

- Há redução da penetração com o aumento do %EN devido à redução da contribuição térmica, o que permite a soldagem de chapas finas e aplicação de revestimentos.
- Da avaliação estatística foi determinada que o efeito da I_n sobre a penetração é de 13,1%, entretanto o efeito de %EN é de 71,6%, também a interação é estatisticamente significativa contribuindo com 11,0%.



- É possível selecionar a combinação de corrente negativa e proporção do eletrodo negativo de forma adequada para obter a penetração desejada dependendo da aplicação (revestimento, passe de raiz, manufatura aditiva).



REFERÊNCIAS

BAUMGAERTNER, A. J. Análise dos Parâmetros da Polaridade Negativa na Curva de Corrente de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável Aplicados à Soldagem para Revestimento, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 75 p, 2017.

CIRINO, L. M., Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG [dissertação] Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2009.

DUTRA, J. C.; GONÇALVES e SILVA, R. H.; SAVI, B. M.; MARQUES, C.; ALARCON, O. E. New methodology for AC-pulsed GMAW parametrization applied to aluminum shipbuilding, The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2015.

FARIAS, J. P., Efeito da Soldagem MIG/MAG em Corrente Alternada sobre a Geometria da Solda, Soldagem Inspeção, v.10, n.4, p.173-181, 2005.

JOSEPH, A.; WEBB, C.; HARAMIA, M.; YAPP, D. Variable Polarity (AC) Arc Weld Brazing of Galvanized Sheet, 56th IIW International Conference, Bucharest, July/2003.

KAH, P.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J. Advanced gas metal arc welding process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.67, p.655-674, Jul/2013.

KIM, T. J.; JOE, G. J.; KONG, H. S.; CHO, S. M.; KIM, C. U. The study of variable polarity AC pulse GMA welding system, International Conference on Electrical Engineering, p. 688-691, 2002.

KIM, T.J.; LEE, J.P.; MIN, B.D.; YOO, D.W.; KIM, C.U. Characteristics of Pulse MIG Arc Welding with a Wire Melting Rate Change by Current Polarity Effect, Journal of Electrical Engineering and Technology, v. 2 (3), p. 366-372, 2007.

MIRANDA, H.C.; FERRARESI, V.A. Identificação da transferência metálica na soldagem MIG/MAG pulsada de aço inoxidável a partir de um sensor óptico, 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, Mai/2003.

MONTEIRO, L. S.; SCOTTI, A. A methodology for parametrization of the MIG/MAG CA and its application in service repair of pipelines of oil and gas, 22nd International Congress of Mechanical Engineering, Ribeirão Preto, Nov/2013.

MONTGOMERY, D.C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, Inc. 7th Ed. 2009.
NASCIMENTO, A. S., Fenomenologia da soldagem MIG/MAG-PV e sua aplicabilidade para juntas sobreposta e em V (Passe de raiz). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; [tese] 2011.

NASCIMENTO, A. S.; FERNANDES, D. B.; MOTA, C. A. M.; VILARINHO, L. O. Metodologia para Determinação de Parâmetros para Soldagem MIG com Polaridade Variável, Soldagem e Inspeção, v. 13, n. 2, p. 97-104, São Paulo, Abr/Jun 2008.

NASCIMENTO, A. S.; VILARINHO, L. O. Uma contribuição ao estudo da soldagem MIG-CA, 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2006.

PARK, H. J.; RHEE, S.; KANG, M. J.; KIM, D. C. Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding, Materials Transactions, v. 50 (9), p. 2314-2317, 2009.

SANTOS, T. F., Soldagem MIG com corrente alternada MIG CA [tese]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2008.



SO, W. J.; KANG, M. J.; KIM, D. C. Weldability of pulse GMAW joints of 780 MPa dual-phase steel, *International Scientific Journal*, v. 41 (1), p. 53-60, 2010.

TALKINGTON, J. Variable Polarity Gas Metal Arc Welding, MSc Dissertation, The Ohio State University, 1998.

TONG, H.; UEYAMA, T.; HARADA, S.; USHIO, M. Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system, *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 6 (4), p.203-208, 2001.

VILARINHO, L. O.; NASCIMENTO, A. S.; FERNANDES, D. B.; MOTA, C. A. M. Methodology for Parameter Calculation of VP-GMAW, *Welding Journal*, v. 88, p.92-98, 2009.